УДК 550.831+550.312

Ю.И. Дубовенко, О.А. Черная

О возможностях 4D гравитационного мониторинга геологической среды

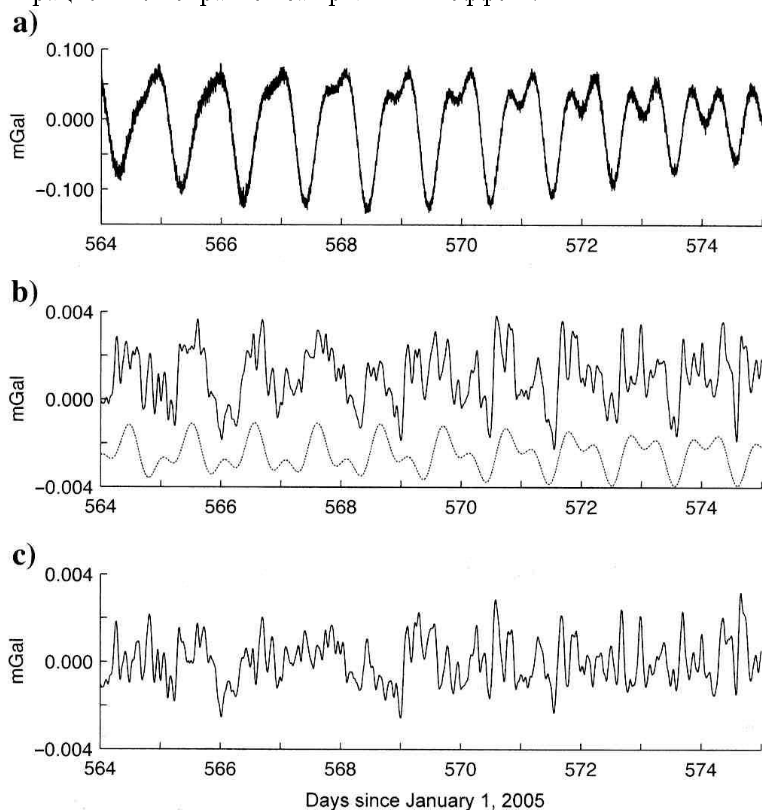
(Представлено академиком НАН Украины В.И. Старостенко)

Определено понятие и возможности 4D гравитационного мониторинга. Предложено обработку его данных на коротких профилях производить по соотношениям с быстро убывающими ядрами, а вариации гравиполя из-за влияния малоинтенсивных геофизических факторов учитывать по методике [12].

На фоне технологического прогресса в условиях экономического спада две тенденции влияют на количество, методику и возможности осуществления крупномасштабных геофизических работ: возросшая точность и производительность гравиметрических сьемок (вследствие совершенствования аппаратуры и топогеодезического обеспечения – систем GPS) и резкое снижение объёма измерений. Первое повлекло за собой пересмотр методов обработки полученных данных, в частности, более точный учёт поправок Буге [1]. Последнее, на фоне необходимости обнаружения более глубинных источников аномалий, влечёт за собой пересмотр методики измерений с целью учёта тонких особенностей гравитационных аномалий. Эти особенности можно „подсечь”, если задействовать дополнительную переменную[1] – время. Мировые „тренды” геофизических наблюдений тяготеют к непрерывному 4D мониторингу [2].

Идея мониторинга подмечена в [3][2] и в некоторой степени проиллюстрирована в [4].

Рис. 1. 11-дневный ряд измерений: без фильтрации, с полосовой фильтрацией и с поправкой за приливный эффект.



Применение *повторных* наблюдений в некой области в гравиметрии сравнительно неново (создание региональных плотностных моделей Кавказа [5], и [6]), хотя *непрерывными* во времени их назвать трудно, а в сейсмометрии это – общепринятая практика.

Определим основные понятия. Назовём *гравитационным мониторингом* ряд *периодически* повторяемых в реальном времени непрерывных на протяжении фиксированного временного отрезка (рис. 1) микрогравиметрических измерений гравиполя и обработку данных с учётом *влияния* окружающей среды и сферы применений. Величина

[1] Возможности методов регуляризации в решении задач построения сложных разрезов при современном уровне модельных представлений о геологической среде близки к технологическому пределу.
[2] На с.82 – „...если современные физико-математические теории строят и исследуют свои функциональные связи и последующие смысловые ряды на территории преимущественно *пространства*, то эксперимент зондирует пока еще не подвластное теории *время*”.

временного отрезка зависит от качества измерений, меры неопределённости результатов наблюдений, динамики (амплитуды и частоты) поля.

Физическая основа гравиметрического мониторинга – непрерывная связь динамики гравиполя и параметров среды[3]. Если деформация дневного рельефа определённого участка есть прямым следствием приповерхностного распределения масс, гравитационный мониторинг можно применять для исследования разуплотнения и флюидного режима этого участка.

Пространственное распределение вариаций вертикальной производной V_z потенциала силы тяжести *прямо коррелирует* с площадным распределением плотностей, а временные вариации V_z чётко определяют вертикальные вариации насыщения флюидов.

Аппаратная основа мониторинга среды – совместные крупномасштабные измерения превышений рельефа по данным GPS и абсолютных значений силы тяжести (сотни стационарных пунктов на сотни км^2).

О методике мониторинга. Применение классической схемы измерений на *регулярной* сети пунктов и перерасчёт значений по известному интегралу Пуассона пригодно для региональных исследований [7], но в локальных условиях, где чаще всего применяют гравимониторинг [8], имеет ряд недостатков [9]. Иногда по ряду причин организация регулярной сети невозможна, а пересчёт из нерегулярной сети на регулярную – задачей более сложная, чем обратное восстановление строения среды.

Решение обратных задач гравиметрии с данными в псевдорегулярных сетях с применением моделей среды типа „бесконечный профиль” приводит к появлению плохо обусловленных систем линейных уравнений, генерирующих бессодержательные результаты. Ввиду этого, и исходя из преимущественно краткой длины реальных профилей, целесообразен альтернативный подход.

Для интерпретации измерений на коротких профилях предложена [9] система линейных интегральных уравнений с быстро убывающими ядрами:

$$S_{n+1}^{+}(x)=v(x)-\frac{1}{2\zeta_n(x)}\int_{-\infty}^{\infty}S_n^{+}(\xi)\left(\cosh\frac{\pi(\xi-x)}{2\zeta_n(x)}\right)^{-1}d\xi+S_n^{+}(x),$$

$$S_{n+1}^{-}(x)=v(x)-\frac{1}{2\zeta_n(x)}\int_{-\infty}^{\infty}S_n^{-}(\xi)\left(\tanh\frac{\pi(\xi-x)}{2\zeta_n(x)}\right)^{-1}d\xi+S_n^{-}(x)$$

$$\zeta_0(x)=S_0^{+}(x)+S_0^{-}(x)=v(x),\ \zeta_0(x)=S_0^{+}(x)+S_0^{-}(x),\ n=\overline{0,\infty}.$$

С учётом этого методика [8] действенна в определённых условиях (региональный фон – полином 1-й степени; известны *плотности* и *положения* границ тяготеющих тел на поверхности; эти тела близки или имеют общие контакты).

Нами предлагается в методике [8] использовать комплекс [10], разработанный на основе [11], и комплекс программ на основе [9].

Интерпретация данных мониторинга для оценки глубины к источнику аномалий и изменения объёма по данным деформации рельефа требует знания приповерхностного распределения масс (по данным гравиметрии). Деформации земной поверхности получают по данным спутниковой геодезии GPS, имеющих ряд преимуществ перед традиционными геодезическими методами[4].

---

[3] Ундуляциям рельефа сантиметрового диапазона отвечают вариации силы тяжести в несколько мГал

[4] Независимость от времени суток, погоды, автоматика, непрерывность, полнота, надежная привязка к сети.

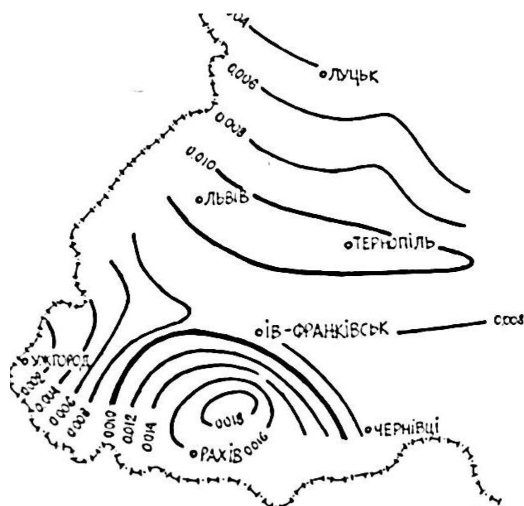


Рис. 2. Изменение гравиполя Западной Украины вследствие перемещения атмосферных масс [12].

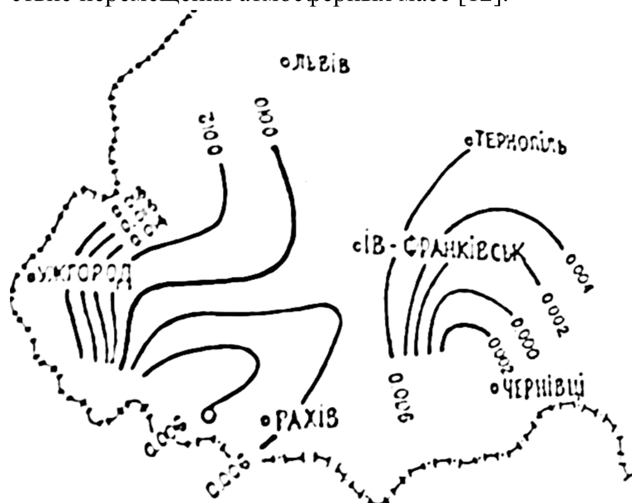


Рис. 3. Изменения гравиполя Западной Украины вследствие перемещения масс в недрах [12].

В [2,7] не учтена особенность вариаций гравитационного поля: колебания величины его производных зависят от флуктуаций малоинтенсивных геофизических факторов[5] [12]. Учитывать эти эффекты можно путём внесения соответствующих поправок при решении прямых задач гравиметрии на исследуемых территориях (вследствие длительного мониторинга участка приблизительно известно его строение).

Влияние притяжения атмосферных масс в центральной сферической зоне (сферическая трапеция 1°×1°) вокруг пункта наблюдений на величину гравитационного поля определяет формула [12] $\delta g_0 = 0.269\Delta P$, где ΔP – аномалия атмосферного давления; влияние снеговых масс – $\delta g_0 = -2\pi f\sigma$, где σ – плотность снега; влияние уровня грунтовых вод на вариации Δg – $\delta g \cong 2\pi f\sigma h$, где h – амплитуда колебания уровня вод; техногенное изменение рельефа – $\delta g = \gamma \cdot \Delta h/L$, где Δh – превышение между пунктами наблюдений за 1 год, L – расстояние между пунктами.

Необоснованное упрощение аналитических моделей среды с целью снижения неоднозначности истолкования во многих случаях является причиной неверных результатов вычислений геометрии источников, вертикального и латерального распределения плотностных неоднородностей, особенно в случаях, когда среда вокруг аномального источника далека от предположений об однородности. Надёжное количественное истолкование динамики масс, например, в мониторинге месторождений углеводородов получают при *известной геометрии* тяготеющих тел (по дан-

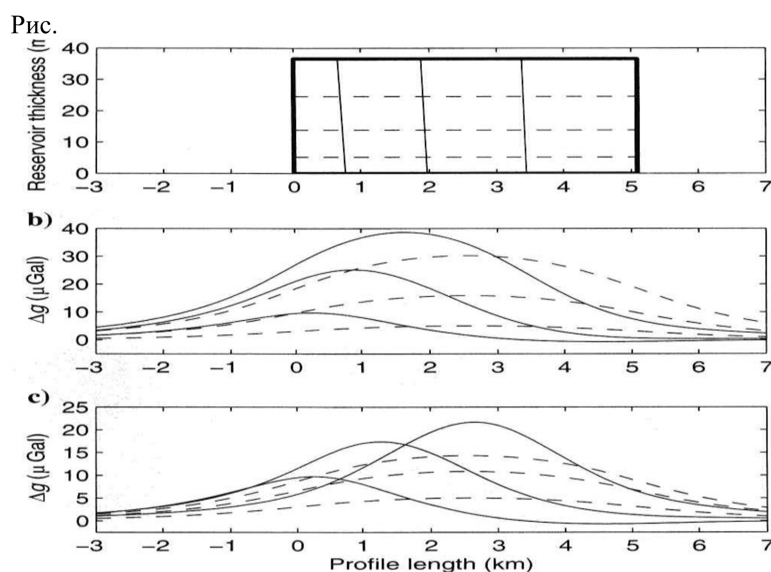


Рис. 4. Разрез бассейна с речными уровнями воды и соответствующие вариации силы тяжести.

[5] Аномальных атмосферных масс (рис. 2), снеговых масс, уровня грунтовых вод, лесистости и изменений рельефа (рис. 3) вследствие техногенной деятельности.

ным сейсмики) и комплексной интерпретации поля силы тяжести и деформаций рельефа.

Требование максимального учёта имеющейся априорной информации о среде мы предлагаем осуществлять:

1. путём надлежащих модельных представлений (звёздные области известной плотности внутри компактных множеств в банаховом пространстве данных);

2. добавлением в функционалы типа невязки (в регуляризирующих алгоритмах) стабилизаторов дифференциального вида, собственные функции которых совпадают с собственными функциями исходных операторов.

Обоснование п. 1 осуществлено в [9], а п. 2 – в [13]. Решение конкретных обратных задач методом регуляризации осуществляется по алгоритмам, изложенных в [14] и подобных им – на основе разработок [9-10].

О применении мониторинга. Повторяемые измерения гравитационного поля применяют в геодезии, сейсмологии и вулканологии (комплексное определение предвестников землетрясений и извержений), для мониторинга флюидной динамики водных бассейнов (рис. 4), месторождений и подземных хранилищ углеводородов в процессе их эксплуатации. При сравнении данных гравимониторинга месторождения и его аналитической модели обнаруживает отклонение наблюдённого поля от модели добычи является сигналом к детальному изучению месторождения методами ГИС и сейсмометрии. Из решения обратной задачи гравиметрии по данным мониторинга можно восстановить *общую* картину вариаций плотности (снижение Δg обозначает уменьшение объёма углеводородов вследствие их добычи и опускание газо-нефтяного контакта, увеличение Δg – поднятие уровня пластовых вод), но не абсолютные значения плотностей.

Гравитационный мониторинг миграции CO_2 в месторождениях углеводородов основан на снижении их объёмной плотности при нагнетании CO_2 в месторождение [15].

Решение сопряжённой обратной задачи[6] – недорогой способ гравитационного мониторинга подземных экосистем мегаполисов и решения иных геоэкологических задач.

1. *Бычков С.Г.* К вопросу о вычислении аномаллий силы тяжести в редукции Буге// // IX геофиз. чтения им. В.В. Федынского. 1-3 марта 2007 г.: тез. докл. - Г., 2007. - С. 73-77.

2. *Battaglia M., Gottsmann J., Carbone D., Fernandez J.* 4D volcano gravimetry // Geophysics. – 2008. – **73**, No. 6. - P. WA3-WA18.

3. *Лоссовский Э. К.* О философии чистой априорной математики как главного конструктивного опорного раздела современного теоретического естествознания: обзор // Геофиз. журн.– 2006. – **28**, № 2. – С. 80-93.

4. *Юргин О.В.* Высокоточная гравиразведка при измерении гравитационных эффектов малоглубинного происхождения: Автореф. дис. … канд. техн. наук. – 25.0010. Пермь, 2006. – 26 с. [Электрон. ресурс] // http://info.-dgtu.donetsk.ua/el_izdan/geolog/news/35_2009-01-13_11-54-38/ugin.pdf

5. *Алексидзе М.А.* Решение некоторых основных задач гравиметрии. – Тб.: Мецниереба, 1985. – 412 с.

6. *Юркина М.И.* Определение измерений гравитационного поля и вертикальных движений земной коры по повторным гравиметрическим и нивелирным наблюдениям // Геодезия и картография. – М., 1978, № 4. – С. 30-35.

7. *Davis K., Li Y., Batzle M.* Time-lapse gravity monitoring: a systematic 4D approach with application to aquifer storage and recovery // Geophysics. – 2008. – **73**, No. 6. – P. WA61-WA69.

8. *Болотнова Л. А.* Эколого-геологическое изучение состояния геологической среды урбанизированных территорий: геофизический аспект / В. В. Филатов, Л. А. Болотнова // IX геофиз. чтения им. В.В. Федынского. 1-3 марта 2007 г.: тез. докл. – Г., 2007. – С. 43-44;

9. *Дубовенко Ю. И.* Определение контактной границы по значениям производных логарифмического потенциала на существенно ограниченных множествах: Автореф. дис... канд. физ.-мат. наук. 04.00.22. / ИГФ НАНУ. –

[6] Истолкование временных вариаций гравианомалий, возникающих вследствие изменения положения водонефтяного контакта либо уровня пластовых вод в недрах.

Киев, 2005. – 19 с.
10. *Legostaeva O.V., Starostenko V.I., Yegorova T.P.* Automatized system of 3-D gravity modelling: the main principles and software // Society Symposia, Solid Earth Geophysics & Geodesy, Annales Geophysicae, Part I, Supplement I. – 1998. – V.16. – P. 26;
11. *Старостенко В. И., Легостаева О. В.* Прямая задача гравиметрии для неоднородной произвольно усеченной вертикальной прямоугольной призмы // Физика Земли. – 1998. – № 12. – С. 31-44;
12. *Двуліт П.Д.* Методи врахування впливу геофізичних факторів на варіації гравітаційного поля Землі. – Дис. ... д-ра техн. наук: 05.24.01. / Львівська політехніка. – Львів, 1999. – 225 с.
13. *Черная О.А*. Исследование обратных задач теории логарифмического потенциала для тел, близких к заданным: Автореф. дис. … канд. физ.-мат. наук: 04.00.22. / ИГФ НАНУ. – Киев, 1999. – 26 с.
14. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация / Тихонов А.Н., Гоначарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. – М.: Наука, 1983. – 200 с.
15. *Gasperikova E., Hoversten G.M.* Gravity monitoring of CO_2 movement during sequestration: model studies // Geophysics. – 2008. – **73**, No. 6. – P. WA105-WA112.